

Динамическая модель комплексного решения задач маршрутизации и абонентского доступа в территориально-распределенных телекоммуникационных сетях

Харьковский институт ВВС им. Ивана Кожедуба

Введение

Важным условием эффективного функционирования как современных, так и перспективных территориально-распределенных телекоммуникационных сетей (ТКС) является максимальная согласованность в решении задач сетевого уровня эталонной модели взаимодействия открытых систем (ЭМВОС) – маршрутизации, ограничения внутрисетевого трафика, управление интенсивностью трафика, поступающего в сеть от ее абонентов [1]. Необходимость координации решений перечисленных задач отвечает требованиям системного подхода при организации управления ТКС как сложной организационно-технической системой.

На практике в современных территориально-распределенных ТКС, большинство из которых спроектированы на основе сетевых технологий IP (Internet Protocol), ATM (Asynchrony Transfer Mode) и MPLS (MultiProtocol Label Switching), задача согласованности стоит достаточно остро. Координация работы протоколов маршрутизации OSPF (Open Shortest Path First), IS-IS (Intermediate System – to – Intermediate System) и PNNI (Private Network – to – Network Interface), используемых в этих технологиях, с механизмами управления поступающим в сеть трафиком GTS (Genetic Traffic Shaping) и DTS (Distributed Traffic Shaping) не осуществляется [1]. Алгоритмы обслуживания очередей WFQ (Weighted Fair Queuing), DFQ (Distributed WFQ) и WRR (Weighted Round Robin), заложенные в механизмы GTS и DTS, осуществляют лишь локальный контроль за перегрузкой отдельных маршрутизаторов ТКС. Перераспределение же абонентского трафика по приграничным маршрутизаторам ТКС осуществляется лишь при перегрузке основного маршрутизатора, на который коммутирован данный абонент или группа абонентов, что не может не сказаться на общей производительности сети.

С целью выяснений причин сложившейся ситуации стоит отметить, что протоколы маршрутизации OSPF, IS-IS и PNNI основаны на комбинаторных методах поиска кратчайшего пути в сети с заданной метрикой, а механизмы GTS и DTS, в свою очередь, используют эвристические схемы типа «корзины маркеров». Разнотипность используемых моделей маршрутизации и доступа заметно усложняет, а иногда и попросту сводит к нулю возможность осуществления координации сетевых процессов и получения согласованных решений задач сетевого уровня. Подобная разобщенность в действиях нередко служит источником возникновения в ТКС перегрузочных явлений как локального, так и глобального характера.

Таким образом, высокий уровень согласованности в решении задач маршрутизации и абонентского доступа может быть достигнут лишь при использовании единой математической модели ТКС, обеспечивающей формализацию процессов управления как сетевыми ресурсами, так и доступом к сети. В этой связи приобретает особую актуальность задача разработки модели комплексного решения задач маршрутизации и абонентского доступа в территориально-

распределенных ТКС. При этом за основу будет принята модель решения маршрутных задач, т.к. именно маршрутизация является основным средством предотвращения перегрузки сети.

Математическая модель маршрутизации в ТКС

Структурную модель как результат морфологического описания телекоммуникационной сети можно представить в виде ориентированного взвешенного графа $\Gamma(R, L)$, множество вершин которого $R = R_i$, $(i = \overline{1, N})$ составляют маршрутизаторы, где N – их общее количество в ТКС; $L = L_{i,j}$, $(i, j = \overline{1, N}; i \neq j)$ – множество дуг, моделирующее цифровые тракты передачи данных (ТПД) между маршрутизаторами сети.

С целью учета высокой динамичности протекающих в сети процессов информационного обмена, адекватно описать функциональный аспект построения ТКС возможно только на основе соответствующих динамических моделей. Наиболее результативным при функциональном описании динамических систем по праву является подход, базирующийся на использовании аппарата дифференциальных или разностных управляемых уравнений состояния. Тогда динамику сети можно отследить с помощью следующей системы неавтономных уравнений загрузки буферов очередей на маршрутизаторах ТКС [2]:

$$x_{i,j}(k+1) = x_{i,j}(k) - \sum_{\substack{l=1, \\ l \neq i}}^N b_{i,l}^{(M)}(k) \cdot u_{i,l}^{j(M)}(k) + \sum_{\substack{m=1, \\ m \neq i,j}}^N b_{m,i}^{(M)}(k) \cdot u_{m,i}^{j(M)}(k) + y_{i,j}(k), \quad (1)$$

где $b_{m,i}^{(M)}(k) = c_{m,i}(k) \cdot \Delta t$, $y_{i,j}(k) = \zeta_{i,j}(k) \cdot \Delta t$, $(k=0, 1, 2, \dots; \Delta t = t_{k+1} - t_k)$; $x_{i,j}(k)$ – объем данных, находящихся на маршрутизаторе R_i и предназначенных для передачи маршрутизатору R_j в момент времени t_k , трактуемый в дальнейшем как переменная состояния; $c_{i,j}(k)$ – скорость передачи данных между маршрутизаторами R_i и R_j в момент времени t_k в тракте $L_{i,j}$; $u_{i,l}^{j(M)}(k)$ – доля пропускной способности тракта $L_{i,l}$, выделенная абонентскому трафику с адресом R_j в момент времени t_k и трактуемая в дальнейшем как маршрутная переменная; $\zeta_{i,j}(k)$ – интенсивность поступления данных на маршрутизатор R_i в момент времени t_k с адресатом R_j от абонентов сети; Δt – период перерасчета маршрутных переменных.

С целью предотвращения перегрузки элементов ТКС, ввиду ограниченности буферов очередей на маршрутизаторах и пропускных способностей ТПД, на переменные состояния и маршрутные переменные накладываются ограничения

$$0 \leq x_{i,j}(k) \leq x_{i,j}^{\max}; \quad (2)$$

$$0 \leq u_{i,l}^{j(M)}(k); \quad \sum_{n=1}^N u_{i,l}^{n(M)}(k) \leq 1, \quad (3)$$

где $x_{i,j}^{\max}$ – емкость буфера очереди на маршрутизаторе R_i для трафиков с адресатом R_j . Выполнение условий (3) гарантирует отсутствие перегрузки канальных ресурсов сети путем ограничения внутрисетевого трафика.

Для описания динамики информационного обмена в ТКС в целом воспользуемся векторно-матричным представлением системы скалярных уравнений (1)

$$X(k+1) = X(k) + B^{(m)}(k) \cdot U^{(m)}(k) + Y(k), \quad (4)$$

где $X(k) = x_{1,2}(k), \dots, x_{i,j}(k), \dots, x_{N,N-1}(k)^T$ – вектор загрузки буферных устройств на маршрутизаторах сети в момент времени t_k размерности $N \cdot (N-1)$; $U^{(m)}(k) = u_{1,2}^{2(m)}(k), \dots, u_{i,j}^{j(m)}(k), \dots, u_{N,N-1}^{N-1(m)}(k)^T$ – вектор маршрутных переменных в момент времени t_k размерности $N \cdot (N-1)^2$; $B^{(m)}(k)$ – матрица пропускных способностей ТПД сети в момент времени t_k размерности $N \cdot (N-1) \times N \cdot (N-1)^2$, элементы которой соответствуют величинам $b_{i,j}^{(m)}(k)$, согласно выражению (1); $Y(k) = y_{1,2}(k), \dots, y_{i,j}(k), \dots, y_{N,N-1}(k)^T$ – вектор абонентской нагрузки на маршрутизаторы ТКС в момент времени t_k размерности $N \cdot (N-1)$.

Вышеописанная динамическая модель маршрутизации адаптирована для дейтаграммных сетей [2] и сетей, ориентированных на виртуальные соединения [3], для гибридных сетей [4] и сетей с комбинированным типом маршрутизации [5], а также для сетей с иерархической маршрутизацией [6]. Несмотря на ряд присущих рассмотренной модели неоспоримых достоинств, ее ограниченность состоит в том, что при некоторых предельных значениях интенсивности абонентской нагрузки $\zeta(k)$, поступающей на маршрутизаторы сети, рассчитать вектор маршрутных переменных $U^{(m)}$ без нарушения ограничений (2) и (3) невозможно, что свидетельствует о перегрузке отдельных подсетей и сети в целом. Данный факт определил необходимость совершенствования предложенной модели маршрутизации путем расширения области ее применения на процессы управления абонентским доступом.

Комплексная модель ТКС

Стоит отдельно отметить тот факт, что структурно территориально-распределенная ТКС представляет собой магистральную (базовую) сеть, для которой источниками внешней нагрузки выступают не отдельные пользователи, а целые абонентские сети как локального, так и корпоративного уровня. Трафик, создаваемый абонентскими сетями, значительно более предсказуем по средней величине его интенсивности и параметрам возможных пульсаций [7]. Это, в свою очередь, позволяет рассматривать величину трафика абонентских сетей как управляемый ресурс, качественное распределение которого на приграничные маршрутизаторы ТКС магистрального уровня может стать эффективным средством предотвращения в последней перегрузочных явлений. На практике абонентские сети обычно коммутируются не на один, а на два и более приграничных маршрутизаторов магистральной ТКС, что особенно характерно для сетей военного назначения. Подобная структурная избыточность позволяет в случае перегрузки одного сегмента ТКС перекоммутировать весь абонентский трафик или его некоторую часть на маршрутизаторы менее загруженных участков магистральной сети.

Для реализации подобной схемы борьбы с перегрузками модель маршрутизации (1) – (4) может быть несколько усовершенствована, причем система уравнений динамики очередей на маршрутизаторах ТКС примет вид

$$x_{i,j}(k+1) = x_{i,j}(k) - \sum_{\substack{l=1, \\ l \neq i}}^N b_{i,l}^{(M)}(k) \cdot u_{i,l}^{j(M)}(k) + \sum_{\substack{m=1, \\ m \neq i,j}}^N b_{m,i}^{(M)}(k) \cdot u_{m,i}^{j(M)}(k) + \sum_{p=1}^M y_{p,i}^j(k) \cdot u_{p,i}^{j(\kappa)}(k), \quad (5)$$

где $y_{p,i}^j(k) = \zeta_{p,i}^j(k) \cdot \Delta t$; M – количество абонентов (абонентских сетей), $\zeta_{p,i}^j$ – интенсивность поступления данных на маршрутизатор R_i в момент времени t_k с адресатом R_j от p -й абонентской сети; $u_{p,i}^{j(\kappa)}(k)$ – доля абонентской нагрузки, поступающей из p -й абонентской сети на маршрутизатор R_i в момент времени t_k с адресатом R_j , трактуемая далее как коммутационная переменная.

Требование к сохранению объема абонентского трафика при его распределении по приграничным маршрутизаторам сети накладывает на коммутационные переменные следующие ограничения:

$$0 \leq u_{p,i}^{j(\kappa)}(k); \quad \sum_{i=1}^N u_{p,i}^{j(\kappa)}(k) = 1, \quad (p = \overline{1, M}; i, j = \overline{1, N}). \quad (6)$$

С учетом уравнения (5), уравнение (4) преобразуется к виду

$$X(k+1) = X(k) + B^{(M)}(k) \cdot U^{(M)}(k) + B^{(\kappa)}(k) \cdot U^{(\kappa)}(k), \quad (7)$$

где $B^{(\kappa)}(k)$ – матрица величин объемов абонентской нагрузки, поступающей на маршрутизаторы сети в момент времени t_k размерности $N \cdot (N-1) \times M \cdot N^2$, элементы которой соответствуют величинам $y_{p,i}^j(k)$, согласно выражению (5); $U^{(\kappa)}(k) = u_{1,1}^{1(\kappa)}(k), \dots, u_{i,l}^{j(\kappa)}(k), \dots, u_{M,N-1}^{N-1(\kappa)}(k)^T$ – вектор коммутационных переменных на момент времени t_k размерности $M \cdot N^2$.

В общем случае динамика состояния ТКС согласно выражению (7) может быть описана в форме линейного векторно-матричного уравнения

$$X(k+1) = X(k) + B(k) \cdot U(k), \quad (8)$$

где $B = B^{(M)}, B^{(\kappa)}$, $U = \begin{bmatrix} U^{(M)} \\ U^{(\kappa)} \end{bmatrix}$.

Критерий качества управления в ТКС

В качестве критерия оптимальности решаемой комплексной задачи маршрутизации и абонентского доступа в территориально-распределенной телекоммуникационной сети выберем минимум квадратичного функционала вида

$$J = \sum_{k=0}^{v-1} \left[X^T(k) \cdot Q_X \cdot X(k) + U^T(k) \cdot Q_U \cdot U(k) \right], \quad (9)$$

где Q_X – диагональная неотрицательно определенная весовая матрица, опреде-

ляемая приоритетностью очередей на маршрутизаторах ТКС; $Q_U = \begin{bmatrix} Q_{U^{(M)}} & 0 \\ 0 & Q_{U^{(\kappa)}} \end{bmatrix}$ –

блок-диагональная неотрицательно определенная весовая матрица, в которой компоненты матрицы $Q_{U^{(M)}}$ определяются важностью трактов передачи данных в ТКС, а компоненты матрицы $Q_{U^{(\kappa)}}$ характеризуют относительную стоимость доступа к тому или иному приграничному маршрутизатору сети; v – количество интервалов Δt перерасчета маршрутных переменных.

Физически квадратичный функционал (9) характеризует суммарные затраты по загрузке буферных устройств маршрутизаторов, пропускных способностей трактов передачи данных ТКС, а также стоимость доступа к сети на протяжении цикла оптимизации $T = v \cdot \Delta t$, и функционально связан с объемом своевременно доставленных абонентских данных. Формулировка подлежащего минимизации функционала (9) позволяет реализовать свойство прогнозирования предполагаемого состояния ТКС на некотором упреждающем временном интервале – периоде прогнозирования, совпадающего по своему смыслу с величиной интервала оптимизации T .

Расчет векторов маршрутных $U^{(m)}(k)$ и коммутационных переменных $U^{(k)}(k)$ осуществляется путем решения вариационной задачи векторной оптимизации с минимизируемым функционалом (9), динамическими ограничениями (8), ограничениями на переменные состояния (2) и управления (3), (6). Для решения подобной задачи существует широкий спектр вариационных [8] и декомпозиционно-координатных методов оптимального управления [9].

Выводы

В работе разработана динамическая модель комплексного решения задач маршрутизации и абонентского доступа в территориально-распределенных телекоммуникационных сетях. Модель ТКС представлена системой линейных разностных управляемых уравнений состояния сети. Комплексный характер модели обеспечило рассмотрение в качестве управляющих переменных как маршрутных, так и коммутационных переменных, что, наряду с введением ограничений (3) и (6), позволило придать необходимую согласованность решению задач маршрутизации и абонентского доступа. Координация решений задач сетевого уровня ЭМВОС является ключевым фактором эффективного использования доступных сетевых ресурсов, залогом предотвращения перегрузки ТКС и повышения ее производительности.

Следующим шагом на пути анализа изложенной модели является сравнительный анализ и выбор эффективных методов решения поставленной оптимизационной задачи, связанной с минимизацией функционала (9) при наличии динамических ограничений (8), ограничений на переменные состояния (2) и управления (3), (6). Актуальной также представляется задача анализа устойчивости получаемых решений к возможным колебаниям нагрузки абонентских сетей, что может быть сопряжено с необходимостью наращивания предложенной модели процедурой ограничения интенсивности поступающего в сеть абонентского трафика.

Дальнейшее развитие предложенного подхода предполагает переход к нелинейным динамическим моделям ТКС, обеспечивающих учет запаздываний, вторных передач, деградации или перестройки структуры сети и др.

Список литературы

1. Вегенша Ш. Качество обслуживания в сетях IP: Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 386 с.
2. Segall A. The modeling of adaptive routing in data-communications networks // IEEE Trans. on communications, 1975. Vol. 25. №1. P. 85-95.

3. Лемешко А.В., Евсеева О.Ю., Гема Н.И. Динамическая маршрутизация в пакетных сетях с гарантированным качеством обслуживания // Радиотехника. 2001. Вып. 123. – С. 45-50.
4. Евсеева О.Ю. Динамическая маршрутизация в гибридных телекоммуникационных сетях // Радиотехника. 2002. Вып. 128. – С. 86-90.
5. Лемешко А.В., Евсеева О.Ю. Функциональная модель адаптивной маршрутизации комбинированного типа // Радиотехника. 2002. Вып.127. С. 152-159.
6. Лемешко А.В. Алгоритм иерархическо-координационного управления информационным обменом в сети передачи данных // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. Сб. науч. трудов ХАИ. Вып. 1, Харьков: Харьк. Авиац. Ин-т, 1998. – С. 323-328.
7. Лемешко А.В., Прозоров А.М., Чепелюк С.А. Характеризация функциональной модели глобальной компьютерной сети // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. Сб. науч. трудов Гос. аэрокосмич. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». Вып. 3, Харьков, ГАКУ, 1999. – С. 110-114.
8. Сэйдж Э. П., Уайт III. Оптимальное управление системами. – М.: Радио и связь, 1982. – 392 с.
9. Сингх М., Титли А. Системы: декомпозиция, оптимизация и управление. – М.: Машиностроение, 1986. – 494 с.